第29卷 第11期 2015年11月
材 料 研 究 学 报 CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH
Vol. 29 No. 11 November 2015

# 表面改性和混杂对超高分子量聚乙烯纤维/环氧树脂复合材料性能的影响*

邱 军 王增义 孙 茜 高雪媛

(先进土木工程材料教育部重点实验室 同济大学材料科学与工程学院 上海 201804)

**摘 要** 采用紫外接枝和与芳纶纤维混杂的方式改善UHMWPE纤维的缺点, 详细研究了接枝单体种类、浓度和纤维混杂等对UHMWPE纤维/环氧树脂复合材料性能的影响。结果表明, 以丙酮为溶剂采用一步接枝法在紫外光辐射下将丙烯酸接枝到UHMWPE纤维表面上, 可显著提高UHMWPE纤维增强的复合材料的弯曲强度、冲击强度和拉伸强度; 随着接枝单体浓度的提高弯曲强度和冲击强度没有明显的变化, 而拉伸强度不断提高。同时, 将UHMWPE纤维与芳纶纤维混杂可提高其与树脂基体生成的复合材料的耐热性。UHMWPE纤维与芳纶纤维按1∶1的质量比混杂, 混杂纤维增强的复合材料在90℃的形变量比UHMWPE纤维增强的复合材料减少66.7%, 显著提高了复合材料的耐热性。

**关键词** 复合材料, 紫外接枝, 混杂, UHMWPE纤维, 芳纶纤维

**分类号** TB332 文章编号 1005-3093(2015)11-0807-07

# Effect of Surface Modification and Hybridization of UHMWPE Fibers on Performance of their Composites with Epoxy Resin

QIU Jun** WANG Zengyi SUN Qian GAO Xueyuan

*(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)*

*Supported by Shanghai Programs for Science and Technology Development No. 12521102204.

Manuscript received May 7, 2015; in revised form July 4, 2015.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (021)69582101, E-mail: qiujun@tongji.edu.cn

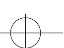
**ABSTRACT** Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers possess outstanding properties such as high tensile strength and low density. However, their low surface polarity and poor heat resistance restrict the application of UHMWPE fibers as a reinforcing material for high performance composites. These shortcomings of UHMWPE fibers can be overcome by ultraviolet (UV) assisted grafting treatment and hybridization with aramid fibers. Results show that UHMWPE fibers could firstly be modified by means of an UV radiation assisted one step grafting process with acetone as solvent and acrylic acid as monomers, then the mechanical properties of composites of epoxy resin with the modified UHMWPE fibers was greatly enhanced; with the increasing monomer content in the acetone solvent, the tensile strength of UHMWPE fibers/epoxy resin composites increased obviously, while there was no significant change of flexural strength and impact strength. In order to further improve the heat resistance of UHMWPE fibers/epoxy resin composites, UHMWPE fibers were hybridized with aramid fibers and then the hybrid fibers were used as reinforcing material to produce hybrid fibers/epoxy resin composites. As a result, the deformation of the hybrid fibers/epoxy resin composites decreased by 66.7% at 90℃ compared to that of UHMWPE fibers/epoxy resin composites. The result proves that the pre-hybridization of UHMWPE fibers is an effective means to enhance the heat resistance of UHMWPE fibers/epoxy resin composites .

**KEY WORDS** composites, UV grafting, hybridization, UHMWPE fibers, aramid fibers

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维是继芳纶纤维、碳纤维之后出现的一种高性能纤维, 具有最高的比强度, 约为普通优质钢材的15倍, 碳纤维的2.6倍[1, 2]。UHMWPE纤维还具有良好的抗湿性、耐化学腐蚀性、耐磨性等特性, 广泛用于制作软质防弹衣、高性能绳索, 防弹橡胶增强材料等。但是UHM-

* 上海市科技攻关项目12521102204资助项目。
2015年5月7日收到初稿; 2015年7月4日收到修改稿。
本文联系人: 邱 军, 教授





WPE纤维由非极性的亚甲基形成的长链组成, 纤维分子间没有较强的作用力, 纤维表面呈现化学惰性, 表面能极低, 用作复合材料的增强纤维时难以与树脂基体形成良好的界面粘接。因此, UHMWPE纤维制成的复合材料在使用过程中常以层间破坏的形式破坏[3, 4]。此外, 纤维的耐热性和抗蠕变性比较差, 熔点比较低(只有136°C), 因此UHMWPE纤维增强的复合材料制品在某些高温作业或长期高载荷环境下变形量很大, 极大地限制了这种轻质复合材料的应用。

为了改善UHMWPE纤维复合材料的界面粘接性能, 研究者已经进行了很多探索。其中紫外接枝改性的反应条件温和, 不破坏纤维结构, 并且对环境无污染。紫外接枝改性采用温和紫外光引发接枝反应, 可在UHMWPE纤维主链上接枝带有羧基、酰胺基、羟基等极性基团的单体, 能有效地增加纤维的极性, 改善纤维与基体之间的界面粘合。Li等[5]在紫外光的辐射下采用一步接枝法处理UHMWPE纤维, 许多极性基团接枝到纤维的表面, 改善了纤维的表面能。Chen等[6]采用紫外光辐射引发对UHMWPE纤维表面进行改性, 纤维表面粗糙度得到提高, 并且与树脂制得的复合材料的拉伸强度提高了近50%。本文采用紫外接枝改性方法对UHMWPE纤维进行表面处理, 研究不同溶剂、不同接枝单体以及接枝单体的浓度对纤维增强复合材料力学性能的影响。并将经过表面改性的芳纶纤维与UHMWPE纤维混杂, 以提高复合材料的耐热性和抗蠕变性能。

## 1 实验方法

### 1.1 实验用试剂

1000D UHMWPE纤维; 1500D芳纶纤维; 乙醇(化学纯); 丙酮(化学纯); 丙烯酸(AA, 化学纯); 二苯甲酮(BP, 化学纯); 丙烯酰胺(AM, 化学纯); XB 3585环氧树脂; Aradur3487固化剂; JD-3028氮化硼离型剂。

### 1.2 UHMWPE纤维的表面接枝处理

将一定量的UHMWPE纤维缠绕在模具大小的玻璃板上放入丙酮溶液中浸泡以除去表面处理剂和附着物, 再将其低温烘干。将一定量的二苯甲酮溶于丙酮中, 向该溶液中加入一定量丙烯酸(丙烯酸含量依次为总含量的20%、40%、50%), 将少许预处理好的UHMWPE纤维浸入该溶液中, 用表面皿盛放到紫外灯鼓风箱(101A-1型不锈钢数显电热鼓风干燥箱, 1000 W紫外灯)中, 通氮气10 min后开始紫外辐照, 表面皿距离紫外灯25 cm, 正反面各辐射2 min。辐射完成后将辐射过的纤维用丙酮洗涤, 再低温烘干备用。

### 1.3 UHMWPE纤维/环氧树脂复合材料板的制备

称取一定量的环氧树脂和固化剂, 搅匀后涂到铺展的处理好的纤维上, 浸渍完全。将紫外接枝处理的纤维(或与芳纶纤维质量比1∶1的混杂纤维)转移到模具中, 再放到YXC-50型热压机中进行热压, 热压温度控制在上下板均为60℃, 凝胶后加压到10−15 MPa, 固化2.5−3 h。自然冷却后取出复合材料板, 按照测试要求进行切割。

### 1.4 性能表征

材料的表观接枝率为$R=(m_1-m_0)/m_0$, 其中$R$是表观接枝率; $m_0$为接枝前质量; $m_1$为接枝后的质量。按照GBT 3362-2005标准, 使用DXLL5000型双丝杆电子拉力机测试复丝的拉伸性能。依据国家标准GB/T 3356-1999, 使用DXLL5000型双丝杆电子拉力机测试复合材料的弯曲性能, 试样的尺寸为160 mm×10 mm×3 mm, 测试条件为曲线水平为止, 弯曲速度为2 mm/min。

依据国家标准GB/T 1043-93, 使用塑料摆锤冲击试验机测试复合材料的冲击性能, 试样的尺寸为80 mm×10 mm×3 mm, 其中断口用缺口型制样机制备。使用EQUINOXSS/HYPERION2000型红外光谱仪测定红外光谱, 采用ATR方法进行。依据国家标准为GB/T 1634.2-2004, 采用维卡软化点变形温度测定仪测试复合材料热变形, 记录复合材料在60℃、90℃、120℃下的变形量。用Quanta 200 FEG型场发射环境扫描电镜观察复合材料断口的微观形貌。

## 2 结果和讨论

### 2.1 表面接枝与UHMWPE纤维增强的复合材料力学性能的关系

2.1.1 溶剂和接枝单体种类与UHMWPE纤维/环氧树脂复合材料力学性能的关系　表1给出了分别以$C_2H_5OH$和$CH_3COCH_3$为溶剂, 以浓度均为20%的AA和AM为接枝单体处理后的UHMWPE纤维/环氧树脂复合材料冲击强度和弯曲强度的对比。可以看出, 以$CH_3COCH_3$为溶剂, 以AA为接枝单体处理纤维的效果最好, 复合材料的弯曲强度和冲击强度都得到了显著的提高; 而以$C_2H_5OH$为溶剂或以AM为接枝单体的处理效果并不好, 甚至降低了原材料的某些力学性能。其原因是, 以$C_2H_5OH$为溶剂时在紫外光的辐射下乙醇与AA发生酯化反应, 影响了纤维的处理效果; 而以AA为接枝单体,

相对于以AM为接枝单体, AA单体的接枝不仅提升了纤维表面的粗糙度, 而且接枝后的纤维引入了-COOH官能团, 与环氧树脂和固化剂之间形成足够的化学键合, 使纤维与树脂基体之间的粘结性能提高。因此, 在后续研究中主要采用AA作为接枝单体进行表面处理。

为了验证上述反应的发生, 将未处理的纤维和AA接枝后的纤维进行ATR-IR分析, 结果如图1所示。与未处理纤维对比, 接枝AA的纤维在1400 $cm^{-1}$处出现较强的吸收峰; 在1730 $cm^{-1}$处出现强烈的-C=O吸收峰, 并且在1270 $cm^{-1}$处出现-COOH中的-C-O吸收峰;$-\underset{|}{CH}-$还在1180 $cm^{-1}$出现-COOH上-OH的吸收峰[7, 8], 这证明了接枝反应的完成; 此外, 接枝样品在1580 $cm^{-1}$处出现AA单体中-C=C-的吸收峰, 说明还有未反应的AA单体吸附在纤维表面, 难以除去。未处理的纤维在1745 $cm^{-1}$处有微弱的-C=O吸收峰, 因为纤维表面有丙酮杂质。实验前用丙酮浸泡纤维进行预处理, 烘干纤维时微量丙酮吸附在其表面。

AA与AM接枝UHMWPE纤维属于自由基机理, 图2给出AA接枝UHMWPE纤维的反应机理, AM接枝机理与之相似。

2.1.2 丙烯酸接枝处理对UHMWPE纤维及其复合材料力学性能的影响　图3给出了经过不同浓度的丙烯酸处理后的UHMWPE纤维复丝增强的复合材料的拉伸强度和断裂伸长率。可以看出, 复合材料拉伸强度和断裂伸长率均随着AA单体的浓度的增加而升高, 浓度为20%的AA接枝的UHMWPE

**表1** 溶剂和接枝单体种类与复合材料力学性能的关系

**Table 1** Influence of different solvent and grafting monomer on impact strength and flexural strength of composites

| Solvent | Grafting monomer | Appearance grafting efficiency/% | Impact strength /MPa | Flexural strength /MPa |
|---|---|---|---|---|
| None | - | - | 61.93 | 136.37 |
| $C_2H_5OH$ | AA | 5.16 | 186.54 | 127.02 |
| $CH_3COCH_3$ | AA | 6.41 | 103.54 | 179.56 |
| $C_2H_5OH$ | AM | 2.68 | 98.84 | 58.74 |
| $CH_3COCH_3$ | AM | 4.32 | 99.19 | 135.77 |

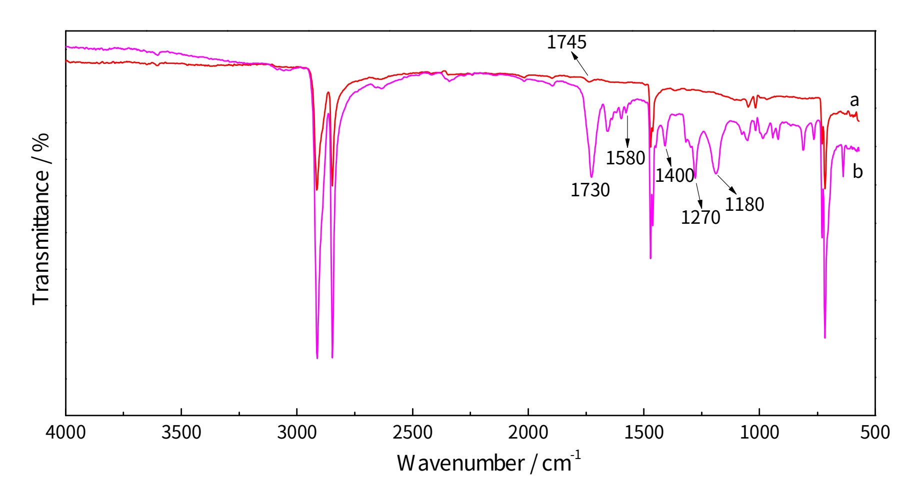



**图1** 不同处理的UHMWPE纤维的红外光谱图

**Fig.1** Infrared spectrum of the UHMWPE treated by different methods (a) ntreated (b) treated by AA

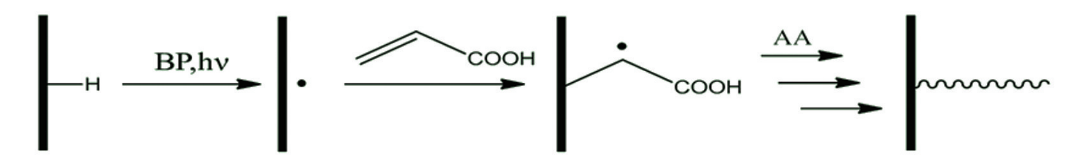



**图2** AA接枝UHMWPE纤维的反应机理

**Fig.2** Reaction mechanism of UHMWPE fibers grafted by AA

纤维复丝增强的复合材料拉伸强度比原材料提高了24.5%, 断裂伸长率提高了4.6%; 浓度为50%的AA接枝的UHMWPE纤维复丝增强的复合材料拉伸强度比原材料提高了68.4%, 断裂伸长率提高了64.3%。从图4的不同样品应力应变曲线更能直观地看出这个变化。复合材料的性能, 一方面取决于纤维和基体的性能, 另一方面更要依赖于它们之间界面的粘合。通过化学键合, 可润湿性、粗糙度比较高的表面间的机械咬合以及较强的分子间范德华力, 可得到良好的界面粘合[9]。UHMWPE纤维的化学组成只含有亚甲基基团, 极性和表面能很低, 表面也非常光滑, 与任何树脂基体之间的粘合比较差。同时, 这种非极性的性质使它们很难润湿, 更不可能与树脂发生化学键合。但是在紫外光的照射下AA单体接枝到了UHMWPE纤维表面, 增加了纤维的极性, 纤维的润湿性也得到提高。并且接枝单体AA浓度越高的, 接枝到纤维表面单体越多, 接枝率越高, 纤维的极性越大, 纤维与环氧树脂的化合作用越强, 纤维粘结性能越好, 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率越高。

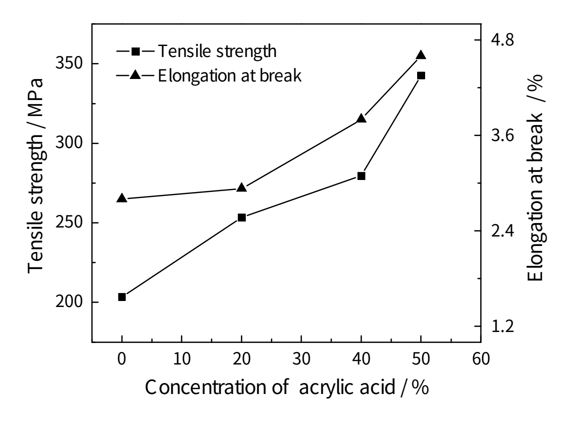



**图3** 丙烯酸的浓度对UHMWPE纤维复丝增强的复合材料拉伸强度和断裂伸长率的影响

**Fig.3** Effect of the concentration of acrylic on the tensile strength and elongation at break of UHMWPE fiber multifilament reinforced composites

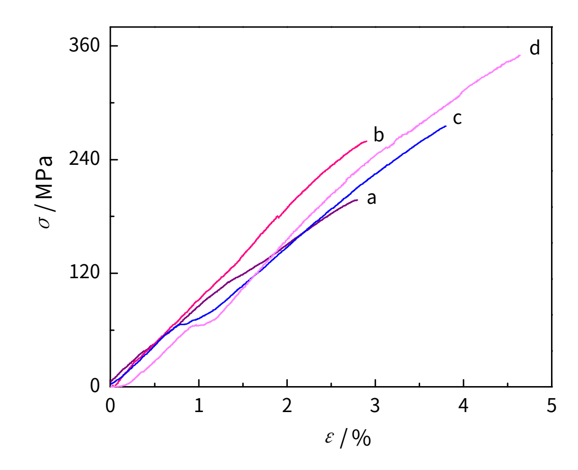



**图4** 不同浓度丙烯酸处理下的UHMWPE纤维复丝增强的复合材料的应力-应变图

**Fig.4** Stress-strain images of UHMWPE fiber multifilament reinforced composites treated by different concentration of acrylic, (a) untreated, (b) 20%, (c) 40%, (d) 50%

图5给出了丙烯酸接枝处理前后UHMWPE纤维的形貌对比。从图5可以看出, 未处理的纤维表面留有纺丝痕, 表面比较光滑(图5a); 而经过接枝处理的UHMWPE纤维纺丝痕依然存在, 但有部分表面区域可以看到有小块状颗粒存在。这可能是自聚的丙烯酸聚合物(图5b), 但没有出现明显的纤维破坏现象。

图6给出了经过不同浓度的AA单体接枝处理后的UHMWPE纤维增强复合材料的弯曲强度和冲击强度, 可以看出, 经过AA单体接枝处理后UHMWPE纤维增强复合材料的弯曲强度和冲击强度比原材料有了明显的提高。经过浓度为20%的AA单体处理的UHMWPE纤维增强的复合材料, 其弯曲强度提高了35.6%, 冲击强度提高了67.1%。但是, 弯曲强度和冲击强度随着AA浓度的升高没有明显的变化。其原因是, AA单体自聚活性较高, 随着AA浓度的提高生成的均聚物增加。这些均聚物吸附在纤维表面, 甚至一部分均聚物在接枝过程中与接枝链交缠在一起, 尽管经过后续一系列清洗和浸泡这些均聚物也很难被清洗掉, 使复合材料中纤维与树脂的界面结合包含了部分均聚物与树脂的结

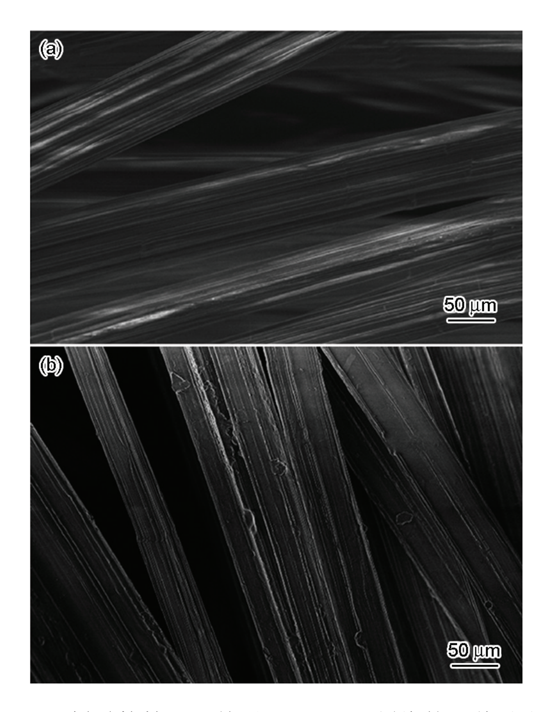



**图5** 丙烯酸接枝处理前后UHMWPE纤维的形貌对比

**Fig.5** Surface morphology of UHMWPE fibers (a) untreated and (b) treated

合。但是这种均聚物的强度非常低, 尤其是冲击强度, 在整个塑料材料中都属于偏低的, 影响了复合材料弯曲强度与冲击强度的提高。

图7给出了纤维处理前后的复合材料冲击断口的SEM形貌图。可以明显地看到, 处理后纤维对应的复合材料断面, 纤维拔脱少, 纤维表面更加粗糙, 粘有更多的树脂, 且纤维表面能观察到明显的破坏; 而未处理纤维对应的复合材料的断面, 纤维拔脱多, 纤维表面比较光滑, 基本没有树脂, 界面分离比较明显且纤维表面观察不到明显破坏。其原因是, 处理后的纤维表面接枝了-COOH, 与基体树脂之间物理粘接性和化学粘接性都得到提升, 界面粘接性更好, 外力的作用通过界面传递给了树脂基体, 使复合材料能够承受更大的破坏, 从而使复合材料性能得以提高。

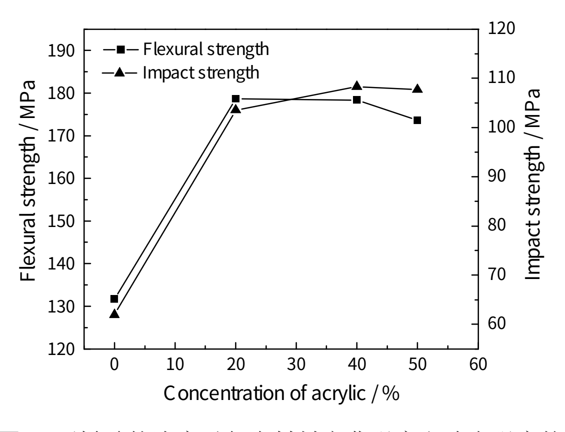



**图6**　丙烯酸的浓度对复合材料弯曲强度和冲击强度的影响

**Fig.6** Effect of the concentration of acrylic on the flexural strength and impact strength of composites

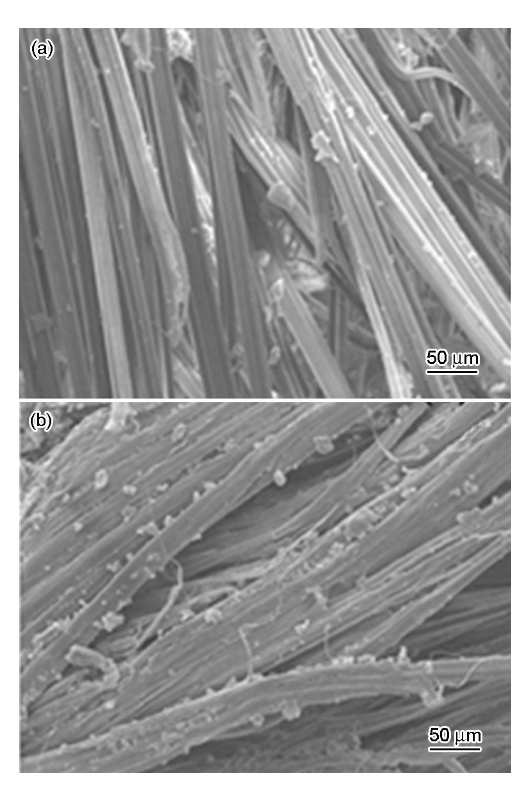



**图7**　纤维处理前后的UHMWPE纤维/环氧树脂复合材料冲击断口的SEM形貌图

**Fig.7** Impact fracture morphology of UHMWPE/Epoxy composites (a) untreated and (b) treated

通过以上对复合材料力学性能的对比, 紫外光改性处理不仅没有破坏纤维的结构, 而且使复合材料的力学性能得到了明显的改善, 而传统氧化方法或者等离子体技术[10, 11]处理纤维可能破坏纤维结构。

### 2.2 UHMWPE纤维/芳纶纤维混杂增强的复合材料的力学性能研究

图8给出了均经过浓度为20%的AA溶液紫外处理的UHMWPE纤维与芳纶纤维质量1∶1混编增强的复合材料和UHMWPE纤维增强的复合材料的力学性能对比。图8表明, 在纤维含量和实验条件相同的情况下芳纶纤维与UHMWPE纤维混杂得到的复合材料, 其力学性能比单用UHMWPE纤维增强的复合材料略有提高。其原因是, 芳纶纤维分子结构中有极性基团酰胺基, 分子具有一定的极性, 可润湿性好, 并且表面能比较高, 更易于与树脂粘合, 使其与树脂基体复合后的界面性能优良。因此, 芳纶纤维与UHMWPE纤维混杂增强的复合材料和树脂界面性能优于单纯使用UHMWPE增强的复合材料。

图9给出了未经过处理的UHMWPE纤维, 经过浓度为20%的AA溶液紫外处理的UHMWPE纤维, 以及经过浓度为20%的AA溶液紫外处理的UHMWPE纤维/芳纶纤维混杂增强的复合材料在60, 90, 120℃下的变形量。可以看出, UHMWPE纤维/芳纶纤维混杂增强的复合材料的耐热性比同条件下单纯使用UHMWPE纤维增强的复合材料大幅度提高。在90℃表面处理后的UHMWPE纤维增强的复合材

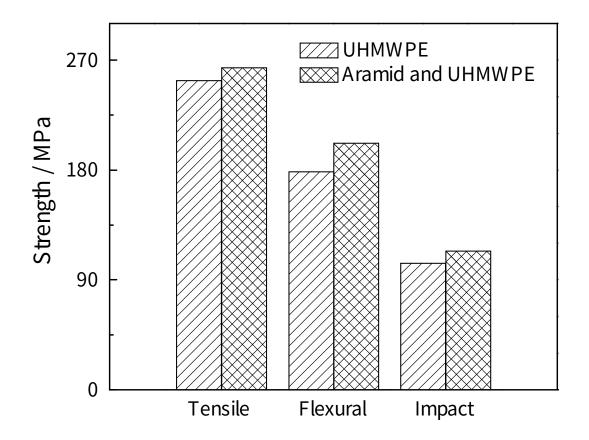
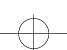



**图8**　芳纶/UHMWPE混杂纤维复合材料与UHMWPE纤维复合材料力学性能的对比

**Fig.8** Mechanical properties of Aramid/UHMWPE fibers composites and UHMWPE fibers composites



料的形变量, 比未处理的纤维UHMWPE纤维增强的复合材料减少了11.1%。其原因是, 表面处理提高了UHMWPE纤维与基体树脂的界面作用, 限制了复合材料在高温下的位移, 从而提高了耐热性。混杂纤维增强复合材料的形变量比同条件下的UHMWPE纤维增强的复合材料形变量减少了66.7%, 而且明显地减缓了复合材料随温度升高的变形过程。其原因是, 芳纶纤维具有极高的耐热性(芳纶纤维具有良好的热稳定性, 能长期在180℃下使用[12]), 与UHMWPE/芳纶混杂提高了复合材料的耐热性。

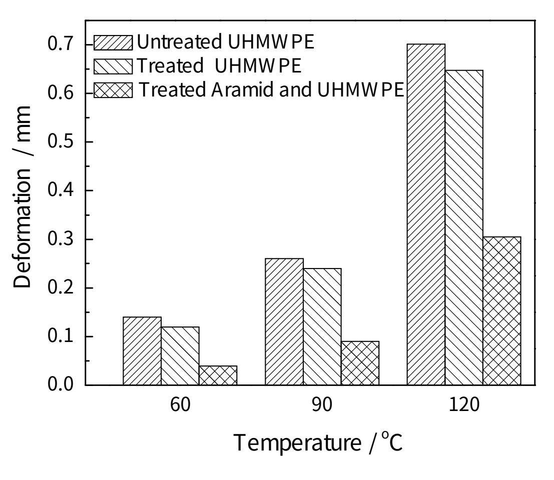



**图9** 不同纤维增强的复合材料的变形量对比

**Fig.9** The deformation of composites with different fibers

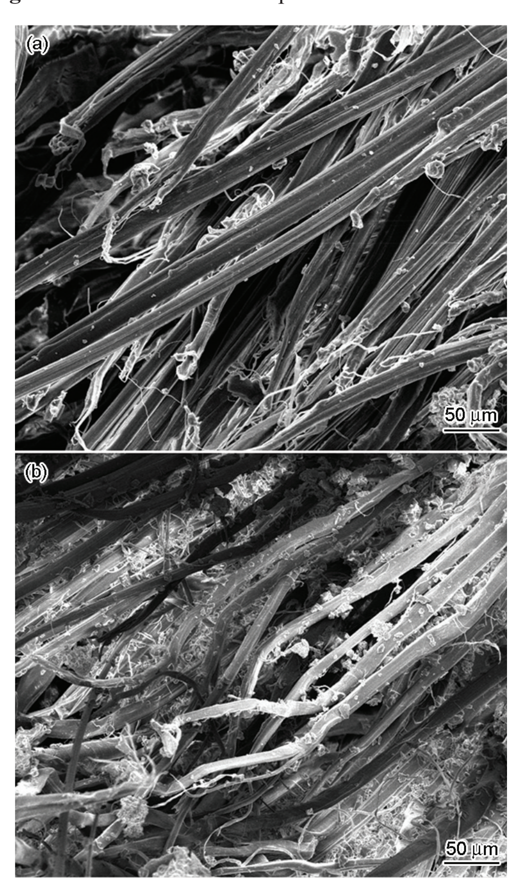



**图10** 不同纤维增强的复合材料冲击断口的SEM形貌图

**Fig.10** Impact fracture morphology of different fiber composites (a) UHMWPE and (b) Aramid/UHMWPE

图10给出了经过相同处理条件, UHMWPE纤维和UHMWPE纤维/芳纶纤维质量1∶1增强的复合材料冲击断口的SEM形貌图。可以看出, 混杂纤维增强的复合材料断面受到的破坏更加严重, 其表面更加粗糙, 而且表面粘结了更多的树脂。这些结果说明, 混杂纤维与复合材料界面粘结性能要优于纯UHMWPE纤维与复合材料界面性能。这符合了本文前半部分论及的芳纶纤维与UHMWPE纤维混杂制备的复合材料, 其力学性能比单用UHMWPE纤维增强的复合材料有所提高的结果。

## 3 结 论

1. 以丙酮为溶剂、以AA为接枝单体对UHMWPE纤维表面进行紫外改性处理, 比以乙醇为溶剂、以AM为接枝单体的效果好。

2. UHMWPE纤维表面处理可明显改善其增强的复合材料的力学性能。复合材料的拉伸强度在一定范围内随着接枝单体AA的浓度增加而增大, 接枝单体浓度为50%时拉伸强度约提高了68.4%, 弯曲强度和冲击强度随着AA单体浓度没有明显的变化, 弯曲强度约提高了35.6%, 冲击强度提高了67.1%。

3. 芳纶纤维与UHMWPE纤维以1∶1的质量比混编可明显提高其增强的复合材料的耐热性, 复合材料在90℃的形变量减少了66.7%, 且其力学性能也明显提高。

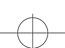
## 参 考 文 献

1 GUO Changsheng, YANG Jianzhong, AN Hongyu, The research of ultra-high molecular weight polyethylene fiber's modification, Hi-Tech Fiber & Application, **39**(6), 21(2014)
(郭昌盛, 杨建忠, 安红玉, 超高相对分子质量聚乙烯纤维改性方法, 高科技纤维与应用, **39**(6), 21(2014))

2 LING Rihui, DU Ya, MU Yi, JIANG Zhirong, ZHAO Guoliang, Effect of ultra-violet irradiation on structure and properties of ultra-high molecular weight polyethylene fibers, Polymer Materials Science and Engineering, **30**(8), 85(2014)
(梁日辉, 都 亚, 牧 艺, 江志荣, 赵国樑, 紫外光辐照对超高分子量聚乙烯纤维结构与性能的影响, 高分子材料科学与工程, **30**(8), 85(2014))

3 WANG Fei, LIU Lichao, XUE Ping, Research progress in preparation technology of ultra-high molecular weight polyethylene fiber, Plastics, **43**(5), 31(2014)
(王 非, 刘丽超, 薛 平, 超高分子量聚乙烯纤维制备技术进展, 塑料, **43**(5), 31(2014))

4 M. M. Xiao, J. R. Yu, J. J. Zhu, L. Chen, Effect of UHMWPE con-



centration on the extracting, drawing and crystallizing properties of gel fibers, Journal of Materials Science, **46**(17), 5690(2011)

5 Z. Li, W. Zhang, X.W. Wang, Surface modification of ultra high molecular weight polyethylene fibers via the sequential photoinduced graft polymerization, Applied Surface Science, **257**(17), 7600 (2011)

6 CHEN Zili, YU Junrong, LIU Zhaofeng, TAN Guanhong, Effect of UV irradiation process on the structure and properties of UHMWPE fibers, Polymer Materials Science And Engineering, **17**(3), 62 (2001)
(陈自力, 于俊荣, 刘兆峰, 谈冠红, 紫外光辐照交联对超高相对分子质量聚乙烯纤维结构和性能的影响, 高分子材料科学与工程, **17**(3), 62(2001))

7 LUO Yuxiang, WU Yue, HU Fuzeng, UV-photo initiated grafting treatment of UHMWPE fibers, Acta Materiae Compositae Sinica, **18**(4), 29(2001)
(骆玉祥, 吴 越, 胡福增, 超高分子量聚乙烯纤维紫外接枝处理, 复合材料学报, **18**(4), 29(2001))

8 LI Zhi, ZHANG Wei, WU Xiangyang, Surface modification of ultra high molecular weight polyethylene fibers via the UV-induced graft polymerization, New Chemical Materials, **39**(11), 46(2011)
(李 志, 张 炜, 吴向阳, 超高分子量聚乙烯纤维表面紫外接枝聚合改性研究, 化工新型材料, **39**(11), 46(2011))

9 ZHU Wuhuang, SU Ping, ZHOU Kechao, Development of ultra-high molecular weight polyethylene fibers and its composites, Materials Review, **19**(3), 66(2005)
(朱武黄, 苏 萍, 周科朝, 超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料的研究现状, 材料导报, **19**(3), 66(2005))

10 Kiranh Kale, Shitals Palaskar, Plasma technology for wettability, dyeability and function finish of polyester and nylon fabrics, BTRA Scan, **43**(1), 18(2013)

11 Choonki Na, Hyunju Park, Preparation of acrylic acid arafted polypropylene nonwoven fabric by photoinduced graft polymerization with preabsorption of monomer solution, Journal of Applied Polymer Science, **114**(1), 387(2009)

12 LI Tongqi, WANG Chengyang, Effect factors and improving methods of the properties of aramid fiber and its Composite, Polymer Materials Science And Engineering, **19**(5), 5(2003)
(李同起, 王成扬, 影响芳纶纤维及其复合材料性能的因素和改善方法, 高分子材料科学与工程, **19**(5), 5(2003))